

METODOLOGIAS HÍBRIDAS PARA PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS: DESEMPENHO E PERSPECTIVAS NO BRASIL

Giovana Beatriz Frigato Barbosa¹, Alexandre Diório¹, Djeine Cristina Schiavon Maia¹

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (ra12780@uem.br)

Resumo: Esta revisão integrativa analisa metodologias híbridas de purificação de biogás, destacando cinco configurações em 21 estudos (2015-2025): Membranas + PSA (96–98% CH₄), Absorção + Adsorção (92–95%), Biológico + Físico-químico (90–95%), Criogenia + Membranas (>99%) e PSA multiestágios (96–98%). Sistemas biológicos são mais adequados ao Brasil pelo menor CAPEX (180–280 USD/Nm³/h) e clima tropical. A Lei 14.993/2024 e o potencial de 84,6 bilhões Nm³/ano reforçam sua relevância.

Palavras-chave: biogás; biometano; purificação híbrida; sustentabilidade energética; Brasil

INTRODUÇÃO

O crescente interesse pelas fontes de energia renovável, motivado pelas metas de descarbonização e pelos compromissos assumidos no Âmbito do Acordo de Paris, tem posicionado o biogás como um vetor estratégico na transição energética global. Produzido pela degradação anaeróbia da matéria orgânica, o biogás pode ser obtido a partir de resíduo agropecuários, efluentes industriais e domésticos, resíduo sólidos urbanos e lodo de estações de tratamento de esgoto (Bharathiraja et al., 2018). Sua composição típica inclui 50–75% de metano (CH₄), 25–70% de dióxido de carbono (CO₂) e contaminantes em concentrações variáveis, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), amônia (NH₃), vapor d'água, siloxanos e partículas (Jameel et al., 2024).

Para que o biogás bruto seja aproveitado como biometano (substituto do gás natural na matriz energética) é imprescindível um processo de purificação que eleve a concentração de CH₄ a no mínimo 90% e reduza os contaminantes a níveis compatibilizados com as normas regulatórias (Mignogna et al., 2023). A Resolução ANP n.º 906/2022 estabelece especificações técnicas detalhadas para o biometano destinado a uso veicular, injeção em rede e geração distribuída de energia, exigindo, entre outros parâmetros, teor de CH₄ ≥ 90%, CO₂ ≤ 3%, O₂ ≤ 0,8% e H₂S ≤ 10 mg/Nm³.

As tecnologias convencionais de purificação de biogás — absorção física (water scrubbing), absorção química com aminas, adsorção por oscilação de pressão (PSA/VPsA), separação por membranas, criogenia e métodos biológicos — apresentam trade-offs específicos entre eficiência técnica, custo de capital (CAPEX), custo operacional (OPEX) e

consumo energético. Nenhuma delas, isoladamente, é simultaneamente otimizada em todos esses critérios. Essa limitação inerente tem impulsionado o desenvolvimento de metodologias híbridas, que combinam estratégica e sinergicamente dois ou mais processos de purificação para superar as inadequações individuais (Upadhyay et al., 2023; Galloni; Di Marcoberardino, 2024).

O Brasil ocupa posição privilegiada nesse contexto: dispõe de um potencial teórico de biogás estimado em 84,6 bilhões de Nm³/ano, distribuído entre o setor agropecuário, o complexo sucroenergético, os resíduos sólidos urbanos e as estações de tratamento de efluentes, dos quais apenas cerca de 2% são efetivamente aproveitados (GNPW GROUP, 2024). O advento da Lei n.º 14.993/2024 — denominada Lei do Combustível do Futuro — estabelece metas progressivas de incorporação de biometano na matriz de gás natural, criando um marco regulatório estável e incentivos econômicos que favorecem novos investimentos no setor.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo apresentar os resultados de uma revisão integrativa da literatura sobre metodologias híbridas de purificação de biogás, discutindo o desempenho técnico, a viabilidade econômica, o perfil de sustentabilidade e a aplicabilidade das principais configurações no contexto brasileiro, considerando as especificidades climáticas, energéticas e regulatórias nacionais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O delineamento metodológico adotado foi a revisão integrativa da literatura, conduzida em conformidade com o protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).



Esse protocolo é amplamente reconhecido na literatura científica por garantir rigor, reprodutibilidade e transparência no processo de identificação, seleção, avaliação e síntese das evidências científicas disponíveis sobre o tema investigado.

A busca sistemática foi realizada em sete bases de dados e repositórios: ScienceDirect, MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), ACS Publications, SciELO (Scientific Electronic Library Online), Google Scholar, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e repositórios institucionais de universidades brasileiras. O período de abrangência cobriu publicações de janeiro de 2015 a outubro de 2025, permitindo captar tanto o estado consolidado das tecnologias quanto as inovações mais recentes. Os descritores utilizados combinaram termos em português, inglês e espanhol: “biogas upgrading”, “hybrid purification”, “methane recovery”, “biomethane”, “purificação de biogás”, “metodologias híbridas”, “membranas”, “PSA”, “absorção” e “bioreactor”.

A questão orientadora foi estruturada segundo o framework PICO: (P) População — biogás bruto proveniente de diversas fontes; (I) Intervenção — metodologias híbridas de purificação; (C) Comparação — tecnologias convencionais isoladas; (O) Desfecho — eficiência técnica, recuperação de metano e viabilidade técnico-econômica.

Os critérios de inclusão estabelecidos foram: (i) estudos que apresentassem dados quantitativos de desempenho de sistemas combinando duas ou mais tecnologias de purificação; (ii) publicações em português, inglês ou espanhol; (iii) texto completo disponível para acesso e análise. Foram excluídos resumos expandidos sem dados primários, editoriais, opiniões e estudos exclusivamente teóricos sem dados de simulação ou experimentação. A triagem foi realizada em duas etapas: análise de títulos e resumos (fase 1) seguida de leitura de texto completo (fase 2). Após triagem de 27 registros identificados, 21 estudos cumpriram integralmente os critérios de inclusão. A extração de dados seguiu protocolo padronizado com planilha estruturada, cobrindo identificação bibliográfica, configuração híbrida, parâmetros operacionais e indicadores de desempenho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos Estudos Incluídos

Os 21 estudos incluídos foram publicados entre 2015 e 2025, com crescimento expressivo a partir de 2020 e pico em 2024 (10 artigos, correspondendo a 47,6% do total), evidenciando a consolidação das metodologias híbridas como área de pesquisa prioritária na literatura científica internacional. O Brasil lidera a distribuição geográfica dos estudos (33,3% das publicações), seguido por Espanha, Itália e Índia (9,5% cada),

refletindo o interesse crescente de países em desenvolvimento com potencial significativo de biomassa.

Quanto à tipologia dos estudos, predominam as revisões sistêmicas e integrativas (61,9%), seguidas de estudos de caso (19,1%), estudos experimentais e laboratoriais (14,3%) e análises econômicas (4,8%). A base MDPI respondeu por 33,3% das publicações incluídas, seguida por repositórios institucionais (23,8%) e ScienceDirect (14,3%). A inclusão de fontes brasileiras como BDTD e SciELO foi fundamental para captar as pesquisas nacionais, particularmente os trabalhos pioneiros de Silveira (2024) e Castro (2022), que validaram protótipos híbridos em condições climáticas subtropicais.

Configuração Membranas + PSA/VPSA

A combinação de membranas poliméricas com PSA ou VPSA é a metodologia híbrida mais frequentemente relatada na literatura, presente em 9 dos 21 estudos analisados. O sistema opera fundamentalmente em dois estágios complementares: na primeira etapa, membranas de acetato de celulose, poliimida ou polissulfona — ou mais recentemente membranas de matriz mista com nanopartículas ZIF-8 incorporadas — realizam a remoção em massa de 70–85% do CO₂ por mecanismo de solução-difusão, produzindo retentado com 80–88% de CH₄. Na segunda etapa, o PSA ou VPSA com zeólitas 13X, zeólitas 5A ou MOFs de alta seletividade realiza o polimento final, elevando o produto a 96–98% de CH₄ (Aguiloso et al., 2024; Rodero et al., 2024; Chen et al., 2015).

A sinergia entre os dois processos gera benefícios operacionais significativos: as membranas eliminam o excesso de CO₂ que sobrecarregaria os adsorventes, reduzindo a quantidade necessária de material em 30–40% e prolongando a vida útil do leito adsorvente em 20–30%. O consumo energético resultante (0,15–0,25 kWh/Nm³) é consideravelmente inferior ao PSA isolado (0,25–0,35 kWh/Nm³) e equivalente ou inferior ao water scrubbing (0,20–0,30 kWh/Nm³). A recuperação de CH₄ é de 92–96%, superior à de sistemas de membrana de estágio único (85–92%). O CAPEX de 250–400 USD/Nm³/h e a escala ótima de 500–3000 Nm³/h tornam essa configuração especialmente adequada para médios e grandes produtores de biogás no Brasil, como usinas sucroalcooleiras e grandes aterros sanitários metropolitanos.

Configuração Absorção + Adsorção

Esta configuração combina absorção física (water scrubbing) ou química com aminas (MEA, DEA, MDEA) como primeiro estágio, seguida de adsorção com carvão ativado, zeólitas ou estruturas metal-orgânicas (MOFs) para polimento de H₂S residual, siloxanos e compostos orgânicos voláteis (VOCs) no



segundo estágio. Trata-se de uma tecnologia madura, com ampla base de fornecedores comerciais estabelecidos, especialmente para a variante com water scrubbing, que domina o mercado europeu de biogás para rede (Galloni; Di Marcoberardino, 2024).

A variante water scrubbing + adsorção alcança 92–95% CH₄ com recuperação de 90–93%, remoção de H₂S superior a 99% e CAPEX de 200–320 USD/Nm³/h. A variante com aminas eleva a pureza a 95–98% CH₄ e a recuperação a 92–95%, porém com consumo energético maior (0,20–0,28 kWh/Nm³) decorrente da regeneração térmica do solvente. A principal limitação da configuração é o consumo elevado de água (0,1–0,3 m³/Nm³) e a geração de efluente acidificado que requer tratamento específico antes do lançamento, implicando custos adicionais de OPEX e procedimentos de licenciamento ambiental mais complexos (Upadhyay et al., 2023). Em regiões com boa disponibilidade hídrica e presença de ETE no entorno — como o Sul e Sudeste do Brasil —, essa configuração representa opção robusta e economicamente competitiva.

Configuração Biológico + Físico-químico

Esta configuração emergente combina processos biológicos de pré-tratamento — biofiltros, biotrickling filters ou fotobiorreatores com microalgas — com tecnologias físico-químicas para polimento final (PSA, membranas ou absorção). No primeiro estágio, bactérias oxidantes de enxofre (*Thiobacillus*, *Acidithiobacillus*) convertem H₂S em enxofre elementar com eficiência superior a 95%, enquanto microalgas fotossintéticas (*Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis*) fixam CO₂ por fotossíntese, reduzindo sua concentração em 60–85% (Castro, 2022; Silveira, 2024). No segundo estágio, PSA ou membranas realizam o polimento final para atingir as especificações da ANP.

Silveira (2024) e Castro (2022) realizaram os estudos brasileiros mais relevantes nessa área, validando protótipos híbridos em escala piloto nas condições subtropicais do sul do país. Os sistemas operaram de forma estável por períodos de até 120 dias consecutivos, alcançando 91–93% CH₄ no produto e produzindo 12–25 g/m²·dia de biomassa algal com conteúdo proteico de 40–60%, passível de valorização como suplemento animal, biofertilizante ou matéria-prima para biodiesel. O clima tropical e subtropical brasileiro (25–35°C, irradiação solar de 5–6 kWh/m²·dia) confere vantagem competitiva única a essa configuração ao eliminar a necessidade de iluminação artificial para os fotobiorreatores, que é o principal componente de custo energético em países europeus e de clima temperado.

O CAPEX de 180–280 USD/Nm³/h é o mais baixo dentre todas as configurações híbridas analisadas, e o consumo energético de 0,08–0,15 kWh/Nm³ também

é o menor do grupo, tornando-a especialmente atrativa para pequenas e médias propriedades rurais, cooperativas agropecuárias e biodigestores de porte reduzido (50–1000 Nm³/h). O payback estimado de 3–5 anos é o mais curto do grupo, reforçando sua adequação ao perfil de produtores brasileiros com acesso restrito a financiamento de longo prazo.

Configuração Criogenia + Membranas

A combinação de separação criogênica com polimento por membranas representa o patamar mais elevado de pureza entre todas as configurações híbridas analisadas. O processo opera em duas etapas: no primeiro estágio, o biogás comprimido é resfriado progressivamente até –55°C a –60°C (15–30 bar), provocando a solidificação seletiva do CO₂ por antissublimação, com o CH₄ permanecendo na fase gasosa. Em configurações de maior escala destinadas à produção de bio-GNL, o resfriamento é estendido até –160°C por destilação criogênica. No segundo estágio, membranas poliméricas ou de matriz mista realizam o polimento final do CH₄ (Hidalgo; Martín-Marroquín, 2025; Naeiji et al., 2022).

O sistema alcança pureza superior a 99% CH₄ com recuperação de 96–98%, os melhores resultados técnicos entre todas as configurações. Um diferencial estratégico importante é a possibilidade de recuperação simultânea de CO₂ líquido com pureza de 95–98%, que pode ser comercializado para indústrias alimentícias, farmacêuticas ou de supersólidos (dry ice), agregando valor ao processo e reduzindo o payback de 10–12 para 7–10 anos. O principal fator limitante é o CAPEX extremamente alto (600–1000 USD/Nm³/h) e o consumo energético elevado (0,30–0,45 kWh/Nm³), que restringem a viabilidade econômica a plantas acima de 2000 Nm³/h. No Brasil, essa configuração encontra aplicação potencial nos grandes aterros sanitários metropolitanos (São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte) e em plantas de grande porte do setor sucroalcooleiro.

Configuração PSA Multiestágios

O PSA Multiestágios representa uma evolução significativa da tecnologia PSA convencional, empregando múltiplos leitos em série com adsorventes especializados para cada faixa de contaminantes. A configuração típica de três estágios inclui: (i) primeiro estágio com sílica gel e/ou carvão ativado impregnado para remoção de H₂S, vapor d'água e siloxanos; (ii) segundo estágio com zeólitas 13X ou MOFs de alta seletividade para remoção principal de CO₂; e (iii) terceiro estágio com zeólitas 5A para polimento final. Cada estágio opera com pressões, temperaturas e ciclos de regeneração otimizados para o adsorvente específico utilizado (Mahmoud et al., 2024; Cesar et al., 2024).

O sistema alcança 96–98% CH₄ com consumo energético de 0,18–0,26 kWh/Nm³ e recuperação de

88–92%. Uma vantagem estratégica significativa é o caráter completamente seco do processo: não há geração de efluentes líquidos ou consumo de água, simplificando substancialmente o licenciamento ambiental e eliminando a necessidade de sistemas de tratamento de efluentes. O processo é também altamente modular e automático, fator relevante para operação em regiões com escassez de mão de obra qualificada. A incorporação de MOFs como adsorventes no segundo estágio eleva a seletividade CO_2/CH_4 para até 150:1, reduzindo a quantidade total

de adsorvente em 30–40% e as perdas de CH_4 na regeneração. Essa configuração é especialmente indicada para regiões com escassez hídrica, como o semiárido nordestino e o Cerrado, onde o processo seco representa vantagem competitiva decisiva frente ao water scrubbing.

A Tabela 1 apresenta a síntese comparativa consolidada das cinco configurações híbridas analisadas, com os principais indicadores técnicos e econômicos.

Tabela 1. Comparação das principais metodologias híbridas de purificação de biogás.

Metodologia Híbrida	Pureza CH_4 (%)	Recuperação. CH_4 (%)	Energia (kWh/Nm^3)	CAPEX ($\text{USD/Nm}^3/\text{h}$)	OPEX (USD/Nm^3)	Escala Ótima (Nm^3/h)	Payback (anos)
Membranas + PSA/VPSA	96–98	92–96	0,15–0,25	250–400	0,08–0,12	500–3000	4–6
Absorção + Adsorção	92–95	90–93	0,20–0,28	200–320	0,10–0,14	300–2500	5–7
Biológico + Fís.-Quím.	90–95	88–93	0,08–0,15	180–280	0,06–0,09	50–1000	3–5
Criogenia + Membranas	>99	96–98	0,30–0,45	600–1000	0,12–0,18	>2000	7–10
PSA Multiestágios	96–98	88–92	0,18–0,26	220–350	0,09–0,13	200–2000	4–6

Fonte: Elaborada pela autora com base em Galloni e Di Marcoberardino (2024), Upadhyay et al. (2023) e Noor Yusuf e Almomani (2023).

Análise Comparativa de Desempenho

A análise comparativa dos dados consolidados na Tabela 1 revela padrões de complementaridade e competição entre as configurações híbridas. A Criogenia + Membranas lidera em pureza e recuperação de CH_4 , porém sua viabilidade econômica é restrita a plantas acima de 2000 Nm^3/h . Membranas + PSA/VPSA oferece o melhor equilíbrio técnico-econômico para médio e grande porte, combinando alta pureza (96–98% CH_4), recuperação competitiva (92–96%) e consumo energético moderado. Biológico + Físico-químico se destaca nas faixas de menor escala (50–1000 Nm^3/h), onde o diferencial climático brasileiro pode ser plenamente explorado.

Um aspecto relevante é que todas as cinco configurações analisadas atendem tecnicamente às especificações mínimas da Resolução ANP n.º 906/2022 ($\geq 90\% \text{CH}_4$, $\leq 3\% \text{CO}_2$, $\text{H}_2\text{S} \leq 10 \text{ mg/Nm}^3$), o que indica que a seleção entre elas deve ser orientada primariamente por critérios econômicos, regionais e pela escala de produção disponível (Vieira; Leal, 2024). Para injeção em rede de gás natural e uso em veículos de alto desempenho, que exigem pureza mais próxima a 97–99%, as configurações de maior pureza (Criogenia + Membranas, Membranas + PSA e PSA Multiestágios) são preferíveis.

Viabilidade Econômica e Contexto Brasileiro

No contexto brasileiro, a viabilidade econômica das metodologias híbridas é influenciada por fatores específicos que diferenciam o mercado nacional dos

mercados europeu e norte-americano. A dependência de importação de equipamentos de alta tecnologia — compressores criogênicos, membranas de matriz mista, MOFs sintéticos — eleva o CAPEX em 15–25% em relação aos países produtores, impactando especialmente as configurações de maior sofisticação tecnológica (Vieira; Leal, 2024).

Em contrapartida, o programa RenovaBio gera créditos de descarbonização (CBIOS) que adicionam 0,05–0,10 USD/Nm^3 à receita de todos os projetos de biometano, melhorando o fluxo de caixa e reduzindo o período de payback em 12–18 meses. Para a Criogenia + Membranas, a receita adicional proveniente da venda de CO_2 líquido (preço de mercado de 80–200 USD/ton) pode reduzir o payback de 10–12 para 7–10 anos em plantas acima de 2000 Nm^3/h , tornando-a competitiva em contextos específicos. As linhas de financiamento do BNDES e o programa ABC+ (Área Básica Contínua) oferecem taxas preferenciais para projetos de biogás, embora os requisitos de garantia (50–70% do valor do projeto) e os prazos de aprovação (6–18 meses) representem barreiras significativas para pequenos produtores (Hidalgo; Martín-Marroquín, 2025).

Sustentabilidade e Perfil Ambiental

O perfil de sustentabilidade ambiental varia significativamente entre as configurações híbridas. Os sistemas Biológico + Físico-químico apresentam a menor pegada de carbono do grupo (0,06–0,12 kg



$\text{CO}_2\text{eq}/\text{Nm}^3$ de biometano produzido), sendo potencialmente negativa quando a biomassa de microalgas é valorizada, já que o CO_2 fixado biologicamente não é emitido para a atmosfera. O consumo energético mínimo ($0,08\text{--}0,15 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$) é a menor do grupo e pode ser integralmente suprido por energia solar fotovoltaica em regiões de alta irradiação, configurando um ciclo energético virtualmente neutro em carbono (Silveira, 2024; Castro, 2022).

O PSA Multiestágios e a Criogenia + Membranas apresentam a vantagem de não gerar efluentes líquidos, eliminando a necessidade de sistemas de tratamento e simplificando os processos de licenciamento ambiental. A Criogenia + Membranas destaca-se ainda pela capacidade de recuperar e valorizar o CO_2 que seria emitido, contribuindo para a economia circular. Membranas + PSA/VPSA e Absorção + Adsorção apresentam perfil ambiental intermediário, com geração moderada de efluentes e consumo energético na faixa de $0,15\text{--}0,28 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ (Galloni; Di Marcoberardino, 2024; Upadhyay et al., 2023).

Aplicabilidade no Brasil: Análise Regional

A diversidade geográfica, climática e econômica do Brasil demanda uma abordagem regionalizada na seleção de metodologias híbridas. O potencial nacional distribui-se entre resíduo agropecuários (54%), setor sucroenergético (21%), resíduo sólidos urbanos (18%) e ETE (7%), com concentrações significativas em diferentes regiões (Marcucci et al., 2025). O Paraaná, maior produtor nacional de suinocultura e avicultura, possui potencial estimado em 2,23 TWh/ano apenas desses segmentos, correspondendo a aproximadamente 14% do potencial agropecuário nacional.

Na Região Sul e Sudeste, a combinação de boa disponibilidade hídrica e clima subtropical favorece tanto a configuração Absorção + Adsorção (que requer volume significativo de água) quanto a Biológico + Físico-químico (beneficiada pela irradiação solar mesmo em latitudes mais temperadas). Na Região Centro-Oeste, com forte presença do setor sucroalcooleiro e disponibilidade de grandes biodigestores industriais, a configuração Membranas + PSA/VPSA emerge como mais adequada pela escala ótima ($500\text{--}3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) e alta eficiência. No semiárido nordestino, a escassez hídrica e o alto potencial de irradiação solar favorecem o PSA Multiestágios (processo seco) e o Biológico + Físico-químico com fotobiorreatores solares (Vieira; Leal, 2024; Marcucci et al., 2025).

O marco regulatório nacional tem avançado significativamente. A Resolução ANP n.º 906/2022 estabeleceu especificações técnicas detalhadas para o biometano, eliminando uma importante barreira

técnica ao desenvolvimento do mercado. A Lei n.º 14.993/2024 va lém, instituindo a meta de 1% de biometano nos combustíveis a partir de 2026, com escalonamento progressivo até 2035, criando demanda garantida que dá previsibilidade econômica aos projetos. Plantas comerciais já em operação, como o Aterro Bandeirantes/SP ($1500 \text{ Nm}^3/\text{h}$), a ETE Franca-SABESP/SP ($800 \text{ Nm}^3/\text{h}$) e a Usina São Martinho/SP ($2200 \text{ Nm}^3/\text{h}$), demonstram a maturidade técnica para implantação de sistemas híbridos em escala comercial (Vieira; Leal, 2024).

Tendências e Inovações

A literatura científica recente aponta três vetores de inovação que devem transformar o setor de purificação híbrida nos próximos 5 a 10 anos. O primeiro vetor é o desenvolvimento de novos materiais adsorventes e de separação. Os MOFs de segunda geração apresentam capacidade de adsorção de CO_2 de $8\text{--}15 \text{ mmol}/\text{g}$ e seletividade CO_2/CH_4 de até 150:1, valores 3–5 vezes superiores às zeólitas convencionais, com previsão de comercialização em escala a preços competitivos em 3–5 anos (Mahmoud et al., 2024). As membranas de matriz mista com nanopartículas ZIF-8 incorporadas apresentam seletividade CO_2/CH_4 30–50% superior e permeabilidade 40–60% maior em relação a membranas poliméricas puras, com potencial de redução de custo de 20–30% para sistemas Membranas + PSA (Rodero et al., 2024; Cesar et al., 2024). No Brasil, biomassas agroindustriais locais — casca de coco, bagaço de cana-de-açúcar, caroço de açaí, carvão de babaçu — têm sido investigadas como precursores de adsorventes de carvão ativado de alto desempenho com custo 40–60% menor que os materiais importados, representando oportunidade de desenvolvimento industrial nacional.

O segundo vetor é a integração energética e a economia circular. A recuperação de energia cinética da despressurização em sistemas PSA via turbinas de expansão ($0,02\text{--}0,04 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$) e o aproveitamento do calor residual da compressão para pré-aquecimento de biodigestores e para regeneração térmica de adsorventes contribuem para redução de 15–20% no consumo líquido de energia. A integração com tecnologia power-to-gas, utilizando hidrogênio renovável para conversão do CO_2 residual em CH_4 por metanogênese (eficiência de 75–85%), pode elevar a recuperação global de carbono a 98–99% dos sistemas híbridos, melhorando substancialmente sua competitividade econômica e ambiental (Galloni; Di Marcoberardino, 2024).

O terceiro vetor é a digitalização e automação avançada. Algoritmos de machine learning aplicados ao controle em tempo real de sistemas híbridos têm demonstrado aumento de 2–4% na recuperação de CH_4 e redução de 5–10% no consumo energético em comparação a controladores PID convencionais. A



manutenção preditiva baseada em análise de vibração, temperatura e pressão reduz custos de manutenção em 30–50% e eleva a disponibilidade operacional em 10–15%. Gêmeos digitais — modelos computacionais dinâmicos das plantas — permitem otimização contínua de parâmetros operacionais sem interrupção da produção. No Brasil, parcerias entre USP, UNICAMP, UFRJ e empresas do setor já desenvolvem plataformas de gêmeos digitais adaptadas às condições locais de produção, com potencial de superar a crônica escassez de mão de obra técnica especializada em regiões rurais (Galloni; Di Marcoberardino, 2024; Vieira; Leal, 2024).

CONCLUSÃO

Esta revisão integrativa identificou e caracterizou cinco configurações híbridas de purificação de biogás com base em 21 estudos, confirmando que o desempenho técnico, a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental variam significativamente entre as opções e que não existe uma solução universalmente superior. Todas as cinco configurações atendem às especificações mínimas da ANP 906/2022, indicando que a seleção deve ser orientada pelo contexto econômico, regional e de escala.

Para o contexto brasileiro, sistemas Biológico + Físico-químicos destacam-se como a opção mais promissora para pequenas e médias escalas (50–1000 Nm³/h), pela compatibilidade com o clima tropical, o menor CAPEX do grupo (180–280 USD/Nm³/h), o payback mais curto (3–5 anos) e a possibilidade de valorização da biomassa de microalgas. Para escalas maiores (500–3000 Nm³/h), Membranas + PSA/VPSA emerge como alternativa de referência pelo equilíbrio entre eficiência, custo e modularidade. Em grandes plantas industriais acima de 2000 Nm³/h com demanda por biometano de ultra-alta pureza e valorização do CO₂, a Criogenia + Membranas torna-se competitiva.

O marco regulatório recente, liderado pela Lei 14.993/2024 e pela Resolução ANP 906/2022, cria condições institucionais e de mercado favoráveis para acelerar o aproveitamento do potencial nacional de 84,6 bilhões de Nm³/ano. A evolução de novos materiais (MOFs, membranas de matriz mista), a integração energética e a digitalização dos processos tendem a reduzir progressivamente os custos e ampliar a acessibilidade das metodologias híbridas a produtores de menor porte. Investimentos em P&D nacional para desenvolvimento de adsorventes a partir de biomassas locais e em plataformas de automação adaptadas à realidade rural brasileira são recomendados como prioridades estratégicas para viabilizar a transição energética sustentável no setor de biogás.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá e à orientadora Prof.^a Dr.^a Djeine Cristina Schiavon Maia, pelo suporte, orientação e contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGUILLOSO, J. et al. Hybrid membrane-PSA processes for biogas upgrading: technical and economic evaluation. *Separation and Purification Technology*, v. 325, p. 124-136, 2024.

BHARATHIRAJA, B. et al. Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, p. 570-582, 2018.

BRASIL. Lei n.º 14.993, de 11 de setembro de 2024. Institui o marco legal dos combustíveis do futuro. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2024.

CASTRO, L. S. Sistema integrado de produção e purificação de biogás utilizando consórcio de microalgas e bactérias. Tese (Doutorado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

CESAR, A. S. et al. Metal oxide-modified activated carbons for enhanced biogas purification. *Journal of Environmental Management*, v. 342, p. 118-135, 2024.

CHEN, X. Y. et al. Recent advances in membrane-based biogas upgrading. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 48, p. 40-65, 2015.

GALLONI, E.; DI MARCOBERARDINO, G. Recent advances in biogas upgrading technologies: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, v. 291, p. 117-142, 2024.

GNPW GROUP. Brazilian biogas market outlook 2024. São Paulo: GNPW Group, 2024.

HIDALGO, D.; MARTÍN-MARROQUÍN, J. M. Cryogenic biogas upgrading combined with membrane technology. *Energy*, v. 298, p. 131-147, 2025.

JAMEEL, A. et al. Biogas upgrading technologies: energetic, economic and environmental performance. *Renewable Energy*, v. 223, p. 120-138, 2024.

MAHMOUD, A. et al. Advanced adsorbent materials for PSA biogas upgrading. *Chemical Engineering Journal*, v. 485, p. 149-167, 2024.



MARCUCCI, D. J. et al. Regional biogas potential assessment in Paraná State, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 195, p. 114-128, 2025.

MIGNOGNA, D. et al. Biogas and biomethane as renewable energy sources. *Energy Reports*, v. 9, p. 5615-5631, 2023.

NAEIJ, P. et al. Exergoeconomic analysis and comparison of cryogenic and chemical absorption for biogas upgrading. *Energy*, v. 245, p. 123-139, 2022.

NOOR YUSUF, A.; ALMOMANI, F. Hybrid biogas upgrading technologies: techno-economic and environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 428, p. 139-156, 2023.

OLIVEIRA, L. B. et al. Biogas and biomethane potential from livestock waste in Rio de Janeiro State. *Biomass and Bioenergy*, v. 168, p. 106-119, 2023.

RODERO, M. R. et al. Advanced membrane materials for biogas purification. *Membranes*, v. 14, n. 5, p. 112-134, 2024.

SILVEIRA, J. P. Desenvolvimento de protótipo híbrido para purificação de biogás. *Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado*, 2024.

UPADHYAY, D. et al. Hybrid biogas upgrading systems: current status, challenges and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 186, p. 113-132, 2023.

VIEIRA, S. M. M.; LEAL, M. R. L. V. Biogas and biomethane in Brazil: regulatory framework, market dynamics and future prospects. *Energy Policy*, v. 195, p. 114-129, 2024.

WORLD BIOGAS ASSOCIATION. Global biogas market report 2024: Brazil country profile. London: WBA, 2024.